

06;12

Арсенид-галлиевые $p-i-n$ -структуры для детекторов рентгеновского излучения на германиевых и арсенид-галлиевых подложках

© Ю.В. Жиляев, Д.И. Микулик, А.В. Насонов, А. Орлова,
В.Н. Пантелеев, Н.К. Полетаев, Л.М. Федоров, М.П. Щеглов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2011 г.

Рассмотрены особенности создания арсенид-галлиевых $p-i-n$ -структур на германиевой подложке. Определены режимы роста методом ХГФЭ, позволяющие получить $p-i-n$ -структуры высокого качества с электрофизическими характеристиками, близкими к аналогичным при гомоэпитаксии. Исследованы спектры экситонной фотолуминесценции при разных толщинах ультрачистого слоя GaAs и при разных условиях роста.

Успехи в создании рентгеновских детекторов на основе чистого GaAs, полученного гомоэпитаксией, позволяют рассматривать этот материал, как один из наиболее перспективных для данного применения [1,2]. Такие приемники представляют собой $p-i-n$ -структуру с толщиной чистого n^0 -GaAs $\sim 200 \mu\text{m}$ и концентрацией $N_D - N_A \leq 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Эффективному поглощению рентгеновского излучения в рабочей области детектора препятствует наличие n^+ -подложки. Таким образом, необходимо освободить n^0 -слой GaAs от подложки, что связано с серьезными трудностями. Одним из решений этой проблемы является гетероэпитаксиальный рост n^0 -GaAs на германие-

вой подложке, которая может быть удалена химическим травлением. Физической причиной выбора Ge в качестве подложки для роста GaAs является близость значений параметров решеток этих кристаллов ($a_{\text{Ge}} = 5.6575 \text{ \AA}$, $a_{\text{GaAs}} = 5.6535 \text{ \AA}$), что обеспечивает достаточно хорошее согласование по параметру решетки в гетеросистеме GaAs/Ge (0.07%). Другими преимуществами выбора германия в качестве подложки являются высокое качество кристаллов германия и относительная дешевизна.

Получение толстых чистых слоев GaAs на германиевых подложках является существенной проблемой. Следует отметить, что с помощью жидкофазной эпитаксии не удается получить эпитаксиальные слои, сравнимые по степени чистоты с эпитаксиальными слоями, получаемыми, газофазной эпитаксией, а методы MBE и MOCVD не позволяют выращивать достаточно толстые слои. Слои n^0 -GaAs необходимой толщины с требуемыми для рентгеновских детекторов электрофизическими параметрами позволяет получать метод хлоридной газофазной эпитаксии (ХГФЭ). Возможными сложностями при подобном росте являются напряжения, вызываемые в слое разницей параметров решеток слоя и подложки, высокая плотность антифазных доменов, возникающих при эпитаксии полярного вещества на неполярной подложке [3], и взаимная диффузия компонентов веществ. Как правило, преодолеть последнюю пытаются уменьшая температуру роста (ниже 600°C) и увеличивая отношение V/III в газовой фазе [4], при этом скорость роста GaAs на Ge оказывается недостаточно высокой (не более $1 \mu\text{m/h}$).

Цель данной работы — получение толстых (не менее $150 \mu\text{m}$) слоев n^0 -GaAs на поверхности разориентированного германия методом газофазной эпитаксии со скоростью роста порядка $10 \mu\text{m/h}$. Эксперименты проводились в многокамерном реакторе в системе $\text{AsCl}_3\text{—Ga—H}_2$ при температурах роста в диапазоне $700\text{—}750^\circ\text{C}$. Методом диагностики высокочистых слоев GaAs, как было показано в работе [5], является экситонная фотолуминесценция при гелиевых температурах.

Рост GaAs непосредственно на поверхности германия приводит к образованию несовершенного слоя, что связано с появлением многочисленных дислокаций несоответствия и антифазных доменов. Отклонение от стехиометрического состава газовой фазы в сторону элемента V группы должно приводить к образованию вакансий Ga

и атомов As в междоузлии, которые, деформируя кристаллическую решетку, могут снять напряжения несоответствия без образования дислокаций и возникновения антифазных доменов.

Для этого во время процесса осаждения основного n^0 -слоя в зоне роста менялось соотношение III/V компонентов в газовой фазе в пользу мышьяка. Чтобы выяснить, как соотношение III/V влияет на электрофизические параметры слоя, такие как концентрация носителей, подвижность и т.д. В рамках данных исследований были проведены эксперименты по росту чистых слоев GaAs на полуизолирующих подложках GaAs в условиях избытка As. Эксперименты показали, что на спектрах фотолюминесценции (ФЛ) образцов, выращенных с избытком мышьяка в газовой фазе, наблюдается увеличение линии свободного экситона и ослабление линии D_x^0 , отвечающей за излучение экситона, связанного на нейтральном доноре (рис. 1), по сравнению с образцами, выращенными в стандартных условиях. Таким образом, рост в избытке As не приводит к ухудшению электрофизических параметров слоев, а даже, наоборот, приводит к снижению концентрации остаточной примеси.

Эксперименты по росту слоев GaAs на германии в условиях избытка мышьяка показывают, что поверхность эпитаксиальных n^0 -GaAs слоев получается зеркально-гладкой. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, полуширины кривых дифракционного отражения на лучших образцах GaAs на Ge не отличаются от аналогичных данных для арсенида галлия, полученного в процессе гомоэпитаксии, и составляли $\omega_\theta \approx 30''$. Измерения ФЛ показали, что в спектрах слоев, выращенных на Ge, присутствуют экситонные линии, наблюдаемые в n^0 -GaAs (рис. 2). Следует отметить, что для слоев с толщиной меньше $50 \mu\text{m}$ спектральное положение линий было сдвинуто в сторону меньших энергий (рис. 1, *b*). Такой сдвиг может быть следствием растяжения n^0 -GaAs из-за разницы постоянных кристаллической решетки GaAs и Ge.

С увеличением толщины слоя наблюдается не только спектральный сдвиг экситонных линий в направлении значений, характерных для GaAs, но и уменьшение спектральной полуширины (FWHM) экситона, связанного на нейтральном доноре (D_x^0). Уширение D_x^0 , как правило, бывает связано с неоднородностью слоя и повышенным содержанием примеси (существенное влияние примеси проявляется при $N_D - N_A > 10^{14} \text{cm}^{-3}$). Следовательно, уменьшение спектральной

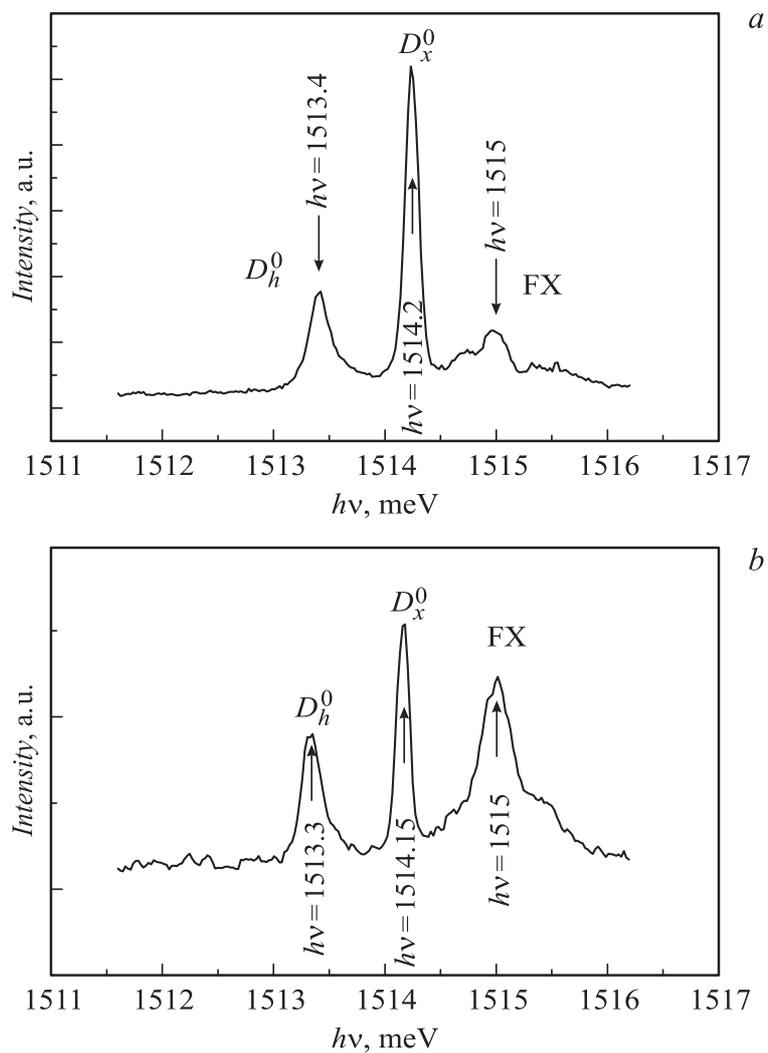


Рис. 1. Спектры экситонной ФЛ n^0 -GaAs, выращенного на подложке полупрозрачного GaAs, при $T = 2$ К: *a* — в стандартных условиях, *b* — в условиях избытка As.

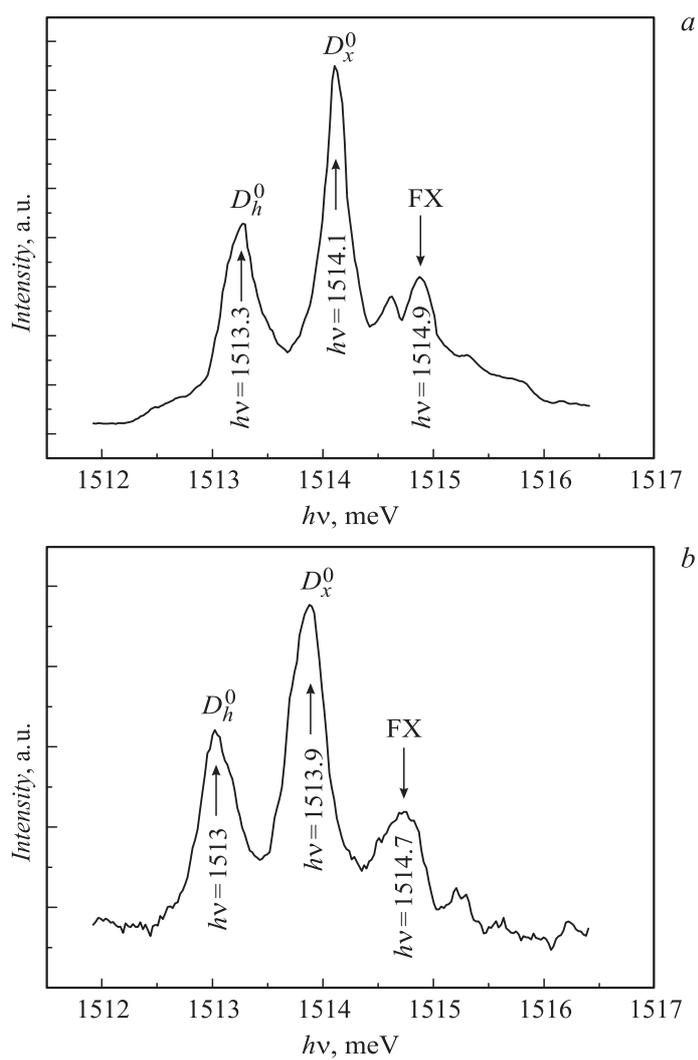


Рис. 2. Спектры экситонной ФЛ n^0 -GaAs, выращенного на германиевой подложке, при $T = 2$ К: a — толщина слоя $d = 150 \mu\text{m}$, $\text{FWHM}(D_x^0) = 0.18 \text{ meV}$, b — толщина слоя $d = 40 \mu\text{m}$, $\text{FWHM}(D_x^0) = 0.3 \text{ meV}$.

полуширины линии D_x^0 говорит о снижении степени неоднородности слоя по мере удаления от подложки Ge. Соотношение интенсивностей спектральных линий позволяет оценить концентрацию остаточных примесей и подвижность основных носителей в материале [5]. Оценка дает значение $N_D - N_A \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{ee} \approx 100\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при $T = 77 \text{ K}$. Лучшие значения, полученные в наших экспериментах при гомоэпитаксии, составляли $N_D - N_A \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{ee} \approx 190\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при $T = 77 \text{ K}$. Теоретический предел подвижности электронов в арсениде галлия при $T = 77 \text{ K}$, обусловленный рассеянием на колебаниях решетки, составляет $\mu_{ee} \approx 300\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [6].

В результате наших экспериментов на германиевых подложках были получены структуры, представляющие собой несимметричный p - n -переход с тонким ($\sim 3 \mu\text{m}$) сильнолегированным p -слоем и толстым ($\sim 150 \mu\text{m}$) чистым слоем n^0 -GaAs. Измерения вольт-амперных характеристик показали достаточно большое значение обратного напряжения пробоя (более 500 V). Для характеристики качества структур использовались измерения диффузионной длины и концентрации остаточной примеси в n^0 -GaAs слое с помощью CV-измерений. Диффузионные длины носителей заряда, определенные с помощью распределения интенсивности электролюминесценции в направлении, перпендикулярном плоскости p - n -перехода, составили около $100 \mu\text{m}$ для лучших образцов. Значения концентрации остаточной примеси, определенные с помощью вольт-фарадных измерений, составили $N_D - N_A < 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, что также соответствует требованиям, предъявляемым к чистоте слоев для рентгеновских детекторов.

Таким образом, методом газофазной эпитаксии в многокамерном реакторе получены структуры арсенида галлия толщиной до $200 \mu\text{m}$, размером 2 дюйма, выращенные на разориентированной поверхности n^+ -германия. По своим электрофизическим характеристикам они близки к соответствующим структурам, выращенным на арсениде галлия, и могут быть использованы для создания рентгеновских детекторных структур.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 08-610 08-504 02-211.

Список литературы

- [1] Дворянкин В.Ф., Дворянкина Г.Г., Дикаев Ю.М. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 121–124.
- [2] Fedorov L.M., Mikulik D.I., Orlova T.A., Panteleev N.K., Poletaev N.A., Snytkina C.A., Zhilyaev Yu.V. // Physics: Conference Series. 2011. V. 291. P. 012051.
- [3] Modak P., Hudait M., Hardikar S. // Cryst. Growth. 1998. V. 193. P. 501.
- [4] Li W., Laaksonen S., Haapamaa J. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 227–228. P. 104.
- [5] Zhilyaev Yu.V., Poletaev N.K., Bitnaryauk V.M., Orlova T.A., Fedorov L.M., Yusupova Sh.A., Owens A., Bavdaz M., Peacock A., O'Meara B., Helava H. // Phys. Stat. Sol. 2003. V. 0(3). P. 1024–1027.
- [6] Sequoia S.A., Stillman G.E., Wolf C.M. // Thin Solid films. 1976. V. 31. P. 69.